

# 締固め砂杭の打設による海底隆起地盤の活用に関する研究

## STUDY ON UPHEAVED GROUND GENERATED BY SAND COMPACTION PILES

平尾寿雄\*・松尾 稔\*\*

By Hisao HIRAO and Minoru MATSUO

The sand compaction piles are often applied in order to improve a poor ground in Japan. The very soft clay layer under a sea inevitably heaves by driving the sand compaction piles in the ground. Since the removal of an upheaved part brings a high cost and a muddy water, it is strongly demanded to utilize the upheaved part as a foundation of structures. This paper describes the results of a proto-type field test in a sea. The generating mechanism of the upheaved ground and its shape by the sand compaction piles are shown with the soil properties. The shear strength of the upheaved ground increases with the effect of the sand piles for drain wells. The deformation characteristics and stability of the upheaved ground are investigated by a field loading test. The loading control method to construct the structure safely on the upheaved ground is also proposed.

### 1. ま え が き

軟弱粘性土層を締固め砂杭によって改良する地盤改良工法は、陸上はもちろん海上工事においても現在広く用いられている。その設計法、施工法は、豊富な施工実績と理論的、実験的研究に基づきほぼ確立されてはいるものの以下の重要課題を残している。一般に、海上工事では軟弱粘性土層中に大口径の砂杭を造成する、一種の強制置換工法として用いられているが、この場合、大量の砂を圧入することにより周辺粘性土が海底面上へ隆起してくる。この隆起地盤部分はきわめて軟弱な粘性土であるうえ、その性状がほとんど不明であったため、通常の工事ではこの部分を撤去してきた。しかし、撤去に際する土砂処分場の確保や海水汚濁防止などが主要課題になるに伴い、構造物の基礎地盤の一部として隆起地盤を活用することが強く求められている。

隆起地盤の実態と特性についての断片的な報告はあるが<sup>1)</sup>、これまでに体系的な研究はなかった。本報告では、締固め砂杭の施工によって生じる隆起地盤を有効に利用

するうえでの技術的課題をまず整理している。次いで、海上で実施した大規模な現場実験をもとに隆起地盤の実態を示し、さらに隆起地盤上に載荷したときの安定および沈下特性について検討を行い、上記技術的課題の解明に努めている。

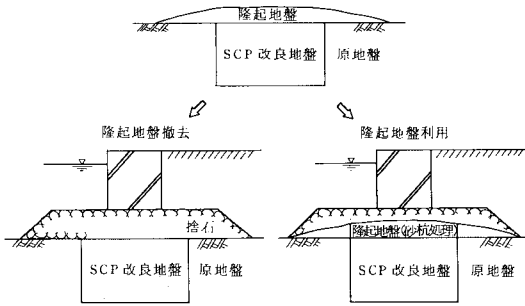
### 2. 隆起地盤に関する技術的課題

隆起地盤の具体的な利用方法を想定し、それに関して解決すべき技術的課題を整理すれば、現場実験の目的と研究の構成がおのずから明確になると考えた。締固め砂杭工法を用いた岸壁、埋立護岸等においては、従来、砂杭を打設した後隆起地盤を撤去し、捨石マウンド上にケーソン等を設置する構造を用いてきた。隆起地盤を活用する場合には、図-1に示すように、隆起地盤部分をサンドドレーン用砂杭や締固め砂杭で処理し、この上に捨石マウンドおよびケーソンを設置する工法が考えられるので、この種の構造を想定して技術的課題を以下のように大別する。なお、図中のSCPはSand Compaction Pile(締固め砂杭)の略記である。また、Sand Drain(サンドドレーン)の略記にはSDを用いるが、これらは以下の図表中においても同様である。

① 隆起地盤は、砂杭の圧入により周辺粘性土地盤が上方および側方へ移動することによって生じる。この際、

\* 正会員 工修 運輸省第三港湾建設局企画課  
(〒650 神戸市中央区海岸通)

\*\* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部地盤工学教室  
(〒464 名古屋千種区不老町)



図一 隆起地盤の利用概念図

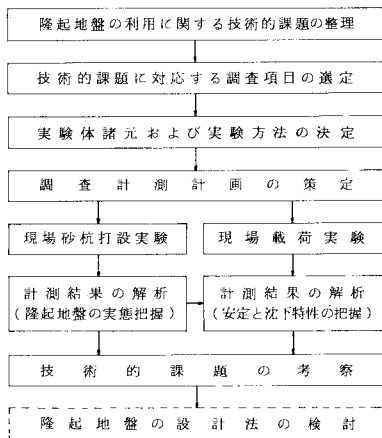
低い拘束圧のもとで粘性土が乱され、地盤の形状が大きく変化する。粘性土部分への砂の混入も予想される。このため、まず第1に、隆起地盤の発生メカニズムを解明し、その形状および性質（物理的および力学的性質）を精度高く推定する必要がある。

② 締め固め砂杭打設後、さらに連続して隆起地盤を砂杭（SD）で処理する場合（後の図一4参照）、隆起地盤部分の拘束圧や強度は特に小さいから、地盤の移動も大きい。このため、砂杭のくびれ、曲がり、切断などが問題となる。砂杭効果が期待できるよう、連続した所定の形状の砂杭が確実に施工されなければならない。

①, ②は、いわば隆起地盤の実態把握である。

③ 想定される上載構造物は、重量が大きいものが多い。砂杭で処理した隆起地盤は載荷時に側方流動や不同沈下を生じず、安定したものでなければならない。

以上のような技術的課題を解明するため現場実験を実施し、体系的に取得した計測および試験データを用いて種々の解析と検討を行った。図一2に研究の構成（流れ）を示す。図一2に従い、3. においては、隆起地盤に関する現場実験の目的と視点を整理した後、実験の諸元を示し、技術的課題解明のために必要な調査、計測の計画



図二 研究の構成

を述べる。4. では、砂杭打設前後の調査、計測をもとに、隆起地盤および隆起地盤中に打設した砂杭の形状と特性について分析する。5. においては、砂杭で処理した隆起地盤上に載荷したときの各種計測結果と載荷前後の土質調査結果に基づいて、隆起地盤の変形特性を分析する。さらに、載荷時の動態観測による安定管理法を検討する。6. では、技術的課題に対する総合的な考察を行う。

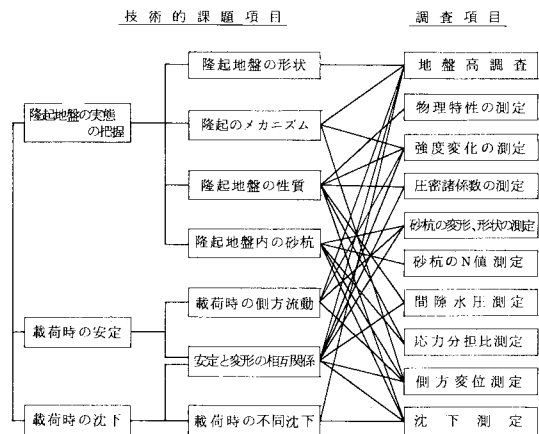
### 3. 隆起地盤に関する現場実験の計画

#### (1) 現場実験の目的と視点

前章で述べた技術的課題についての知見を得るために、実規模の海底地盤改良および載荷実験を行い、実験の各段階において測量、土質調査、計器計測を実施した。図一3の左の列に前章で述べた大きな技術的課題を、また中央の列にそれらをブレイクダウンした項目を示す。さらに、これらを明らかにするうえで必要かつ調査可能な項目を右の列に挙げ、相互の関連を線で結んで示してある。

隆起地盤の実態については、その形状を海底の地盤高調査から、またその性質を土の物理的性質、強度および圧密に関する諸係数の測定、さらに地盤の間隙水圧、沈下測定を通じて把握する。隆起のメカニズムについては、地盤高、側方変位、強度変化の測定をもとに調べる。一方、隆起地盤中の砂杭の変形と形状を調べ、砂杭中心部のN値を測定することによって所定の砂杭が造成されていることを確認した後、載荷中の沈下と側方変位の計測結果に基づき砂杭の効果を検討する。

同様に、載荷時の安定については、地盤高、砂杭の変形、側方変位および強度変化の測定をもとに、また載荷時の沈下は、地盤高、間隙水圧、沈下測定の結果を用いて検討する。さらに、安定と変形の相互関係を分析して、砂杭で処理した隆起地盤を、いわゆる複合地盤として取り



図三 隆起地盤利用にかかわる技術的課題と調査項目

扱えるかどうかを調査する。

以上のように、技術的課題について多面的な検討を行うことによって、現場実験の効率化と信頼度の向上を図る。なお、実験用の地盤改良体は、実験終了後そのまま実際の岸壁築造工事用として使用することになっていたため、非破壊で、かつ限られた期間内で実験を完了させる必要があった。このため、従来主として陸上工事に關して開発されてきた载荷中の安定管理や沈下予測など、いわゆる観測的施工管理手法の海上工事への適用性を調べることも重要課題の1つとなった。

(2) 実験の諸元

現場実験は舞鶴港(京都府)前島地区で、昭和57年7月から昭和58年7月にかけて実施した。実験地点の水深は約8mであり、海底面から約12m厚さの軟弱な沖積粘土層があり、その下に砂礫層が現われる。

実験体の概念図を図-4に示す。実験の諸元および工程は後の岸壁工事に支障のないことを前提に、事前設計を行って決定した。沖積粘土層の地盤改良は、直径1.6mの締固め砂杭を1.7m間隔に正方形配置した。この場合、砂置換率 $a_s$ (全水平面積に占める砂杭部の断面積の割合、図-5参照)は0.7となる。隆起地盤の改良も、同一施工機械を用いて締固め砂杭に連続して砂杭を立ち上げる工法を採用したので、その仕様は直径1.2mの大口径サンドドレーン用砂杭を間隔1.7mの正方形に配置( $a_s=0.4$ )することになった。地盤改良の範囲は、図-4に示すように幅約27mである。

隆起地盤上への载荷体としては底版付きコルゲートセ

ル4基を用いることとし、これを厚さ1mの敷砂(砂杭打設前に敷設し、隆起後不陸を調整)の上部の厚さ2.5mの捨石マウンド上に設置した。実験において作用させる载荷重は、安定解析と変形解析を行い決定した。この場合、港湾構造物の設計においては通常応力分担比 $m$ (粘性土部分への応力に対する砂杭部分への応力の比)の値を1あるいは2とし、円弧すべりによる安全率をそれぞれ1.1, 1.2以上としている<sup>1)</sup>。これを考慮して、本実験では、 $m=1$ で $F_s \geq 1.0$ 、 $m=2$ で $F_s \geq 1.1$ とし、動態観測により载荷中の安全を確保することとした。

(3) 調査計測の計画

敷砂から砂杭打設、载荷、そして载荷体撤去に至る実験の手順を図-6に示す。技術的課題解明のために必要なデータを効果的に取得するためには、(1)で示し

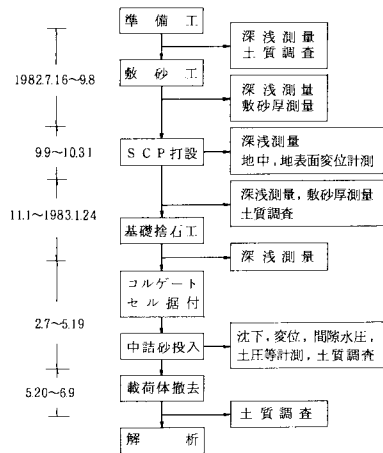


図-6 現場実験の施工順序

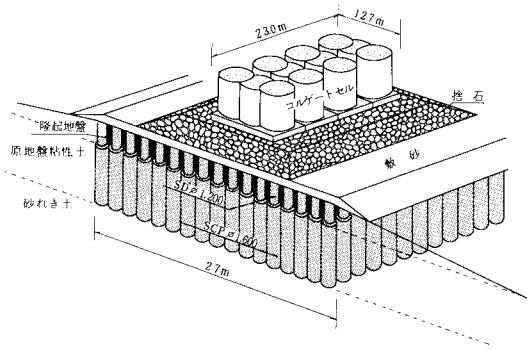


図-4 実験体概念図

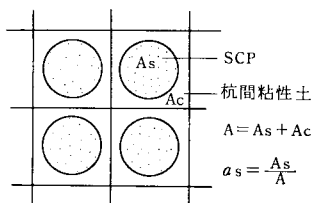
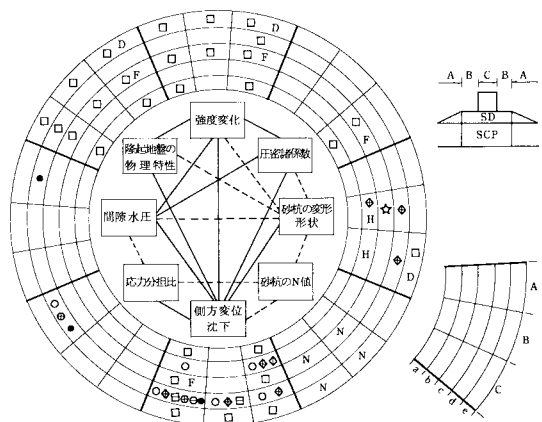


図-5 締固め砂杭で改良された粘性土地盤の水平断面



- 凡例
- 間隙水圧計
  - シンクホールサンプリング
  - F フェイルサンプリング
  - N 標準貫入試験
  - ☆ コルゲートセル掘削
  - D 斜ボーリング
  - 間隙水圧計
  - 層別沈下計
  - 土質計
  - ◎ 載圧計
  - 水圧計
  - ◇ 地中変位計
  - ◇ 挿入式傾斜計
  - H 砂杭頭部側量
  - A 改良区域外
  - B 改良区端部
  - C 载荷区域
  - a 砂杭打設前
  - b 打設中
  - c 打設後
  - d 载荷中
  - e 撤去後

図-7 調査項目と計測機器の関連

た各調査項目について、調査の時期、位置および手段を整理し、計画的に調査計測を行う必要がある。図-7は、このような視点から土質調査および計器計測についてとりまとめたものである。このほか、地盤の移動と隆起状況の調査のため、実験区域の全域において深浅測量、埋設計器頭部の移動量等を調べる。

図-7に従い、実験段階別の調査、計測の目的と内容を概述すると以下のとおりである。

a) 締めめ砂杭打設前：原地盤の形状と土質を把握するため実験区域全域の深浅測量を行うと同時に、砂杭打設による改良区域および地盤の乱れが予想される周辺区域の土質調査を行う。

b) 締めめ砂杭打設中：砂杭打設の進捗に合わせて地盤の隆起と移動の状況を把握するため、深浅測量、傾斜計による側方移動の計測、埋設計器頭部位置の測量を行う。また、砂杭打設に伴う既打設砂杭の変形を傾斜計により調査する。

c) 締めめ砂杭打設後：隆起地盤の形状と土質を把握するため深浅測量と同時に、杭間粘土(図-5参照)と改良域外粘土の土質調査を行う。また、砂杭自体の形状と強度から隆起地盤の改良実態を確認するため、標準貫入試験、コーン貫入試験、粒度分析を行う。

d) 载荷中：载荷による隆起地盤の挙動をもとに複合地盤としての特性を把握するため、载荷体直下、端部、改良域端部の砂杭自体および杭間粘土に関して、層別沈下計、傾斜計、間隙水圧計等による計測を行う。

e) 载荷体撤去後：载荷による隆起地盤の性状変化を把握するため、砂杭自体および杭間粘土に関して土質調査を行う。

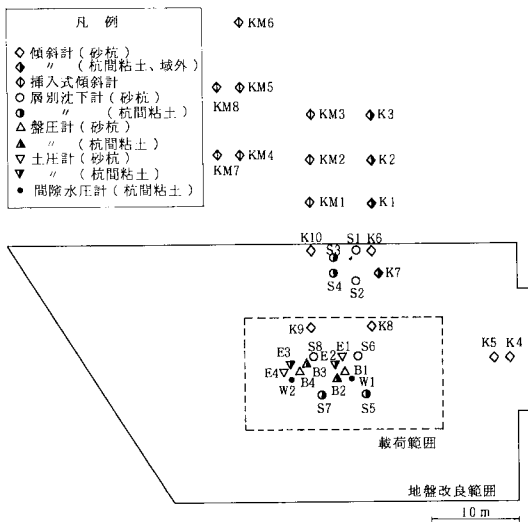


図-8 計器配置図

図-8に計器計測の位置をとりまとめて示す。特に重要な調査項目については、計器を2か所に配置するなど万全を期している。計測は自動計測システムで行った。データの処理はオフラインシステムではあったが、安全に载荷を進め、解析に十分なデータを取得できるような計測、処理頻度を設定した。

#### 4. 砂杭打設後の隆起地盤の実態

##### (1) 隆起地盤の発生状況と形状

砂杭打設に伴う隆起地盤の発生状況を、原地盤の移動、隆起部の平面および断面形状、隆起高さ、隆起土量の面から分析する。

敷砂施工後および砂杭打設後の深浅測量から求めた隆起等高線を図-9に示す。同図には傾斜計埋設管等の頭部の移動状況も併記してある。地盤の隆起の範囲は改良区域の端部から約40mに及んでいる。また、その高さは改良区域の端部で最も高くなり、約4mである。図中の矢印で示す地表面の移動状況は、当然のことながら隆起等高線の発達状況と類似の傾向を示している。

隆起地盤の断面形状の例を図-10に示す。図-9のブロックI打設後の状況を示す図(a)の場合、隆起の範囲は砂杭打設方向に約26m(砂杭下端から約64°の範囲)、背後側に約13m(同約46°の範囲)となっており、砂杭打設方向に大きく発達することがわかる。次いで逆方向に打設したブロックIIでは、図(b)にみられるように、ブロックIの打設によって隆起している部分を押し

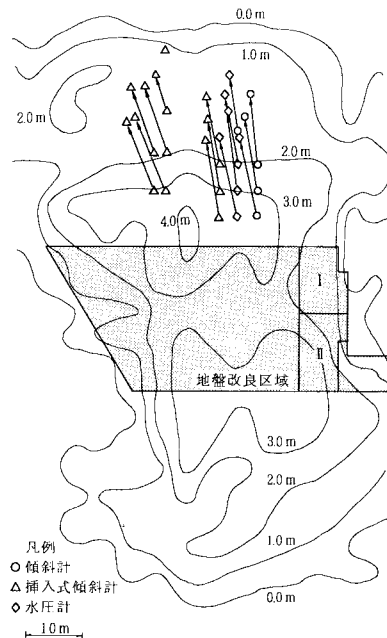
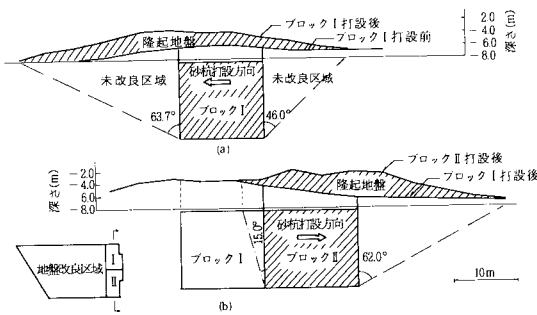


図-9 隆起高さおよび計器移動状況図



図一10 隆起地盤断面形状 (砂杭打設方向別)

し上げる形で発生する。打設方向には約62°の範囲となるが、既打設区域での再隆起は少ない。

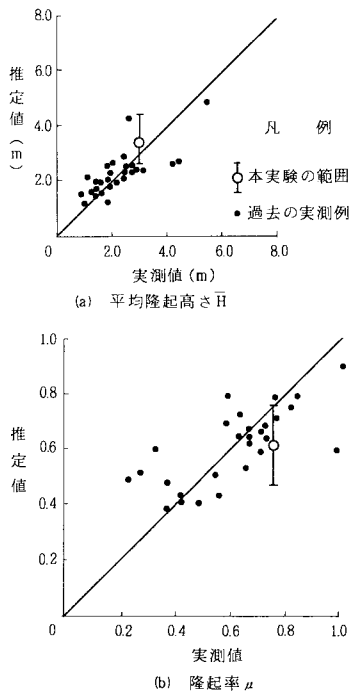
すべての砂杭を打設した後の地盤改良区域内の隆起高さを、5mメッシュの測点における地盤高から求めると、平均高さは3.32mであり、標準偏差は0.62であった。

平均隆起高さ  $\bar{H}$  および隆起率  $\mu$  (隆起土量/打設砂量) については、過去の施工事例の分析に基づき次の推定式が提案されている<sup>1)</sup>。

$$\bar{H} = 2.816 a_s + 0.497 q_u - 0.413 \dots\dots\dots (1)$$

$$\mu = 0.316 a_s - 0.028 \bar{L} + 0.036 q_u + 0.700 \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $a_s$ : 砂置換率、 $\bar{L}$ : 平均砂杭長 (m)、 $q_u$ : 一軸圧縮強度 (tf/m<sup>2</sup>) である。これらの式は図一11に示すデータを回帰分析した結果であるが、そのデータは実



図一11 隆起高さおよび隆起率の実測値と推定値

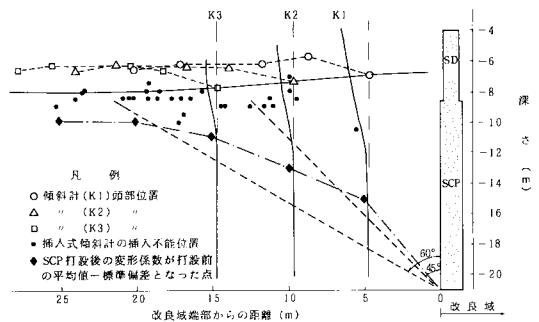
際工事における出来形管理のため概略計測したものである。その精度に基本的な懸念があった。これに対して、今回の実験はきわめて精度高く行ったものであり、その結果を図中に示してある。これによって、将来精度向上の余地を残しながらも、式(1)、(2)は現在のところほぼ妥当なものであることが確認された。

次に、砂杭打設による周辺地盤の乱れの影響範囲をみておくことが重要である。地表面の形状と移動状況、さらに傾斜計が大変形量を示した位置や一軸圧縮試験における変形係数の低下状況 (砂杭打設前後の  $E_{50}/q_u$  で比較) などが情報となる。図一12に示すように、地盤の乱れは改良区域端部の砂杭下端から約45°で発達し、地表面では60°以上の範囲にまで達している。

(2) 隆起地盤粘性土の物理的性質と力学的性質

隆起地盤粘性土を改良域内の杭間粘性土と改良域外の粘性土に分けて、その性状を検討する。

隆起地盤粘性土の平均的な物理的性質を表一に示す。ばらつきについて単位体積重量  $\gamma$  の実測値を例示したのが図一13である。砂杭打設前の原地盤の単位体積重量と比較すると、砂杭打設直後は改良域内・外ともほとんど変わらないが、載荷後には改良域内で圧密による増加がみられ、改良域外でも若干の増加が認められる。図は省略するが、含水比  $w$  は  $\gamma$  の推移に対応した変化を示し、砂杭打設直後はほとんど変わらず、その後圧密の進行により低下する。なお、砂および砂礫の含有量は終始3.0%から4.4%の間であった。このことから、



図一12 周辺地盤の乱れの影響範囲

表一 隆起地盤の物理的性質の推移

		敷砂施工前	砂杭打設直後	砂杭打設1.5~3.5ヶ月後	載荷後
単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	改良域内	14.7	14.7	15.4	15.7
	改良域外		14.7		15.2
含水比 (%)	改良域内	92.8		93.1	77.9
	改良域外			93.5	88.3
砂分含有量 (%)	改良域内	4.4		3.6	3.7
	改良域外			4.2	3.0

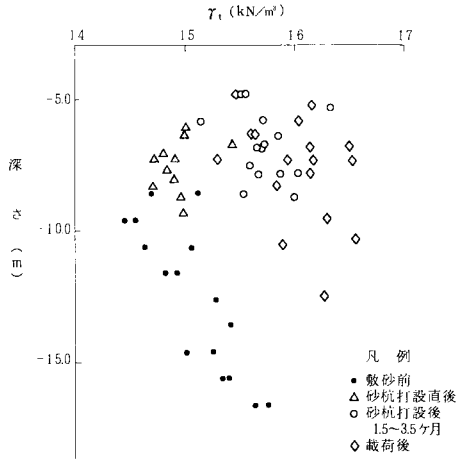


図-13 改良域内原地盤および隆起地盤の単位体積重量

表-2 隆起地盤の一軸圧縮強度の推移

	敷砂前	砂杭打設直後	砂杭打設後 1.5~3.5ヶ月	載荷後
改良域内	1.00	0.46	0.93	1.44
改良域外	1.00	0.72	0.72	1.13

注)  $q_{u0}$  : 隆起高に等しい深さまでの原地盤の一軸圧縮強度  
 $q_u$  : 隆起地盤(改良域外の乱れ影響範囲を含む)の一軸圧縮強度

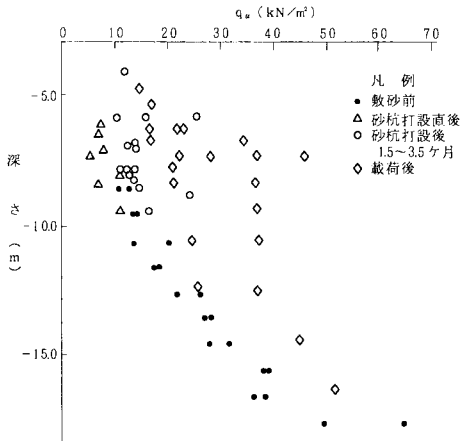


図-14 改良域内原地盤および隆起地盤の一軸圧縮強度

砂杭打設による粘性土部分への砂の混入はないとしてよい。以上のことから、隆起地盤粘性土の物理的性質は原地盤と同一として取り扱ってよいといえる。

隆起地盤粘性土の  $q_u$  の変化を表-2 および図-14 に示す。改良域内では砂杭打設直後に原地盤強度の約 1/2 に低下するが、打設後 3 か月以内にほぼ原地盤強度に回復している。これは、砂杭打設によっていったん乱された粘性土が砂杭の排水促進効果により再圧密されたことに主として起因する。以上のことから、砂杭打設により乱された隆起地盤粘性土は、改良域内では遅くとも数か

月以内で原地盤強度に回復すると考えてよい。

隆起地盤粘性土の圧密降伏応力  $p_c$ 、圧縮指数  $C_c$ 、間隙比  $e$  の深度方向の分布を図-15 に示す。砂杭打設直後の  $p_c$  は有効土被り圧(隆起地盤の自重および敷砂荷重)とほぼ等しく、正規圧密状態となっている。 $C_c$  および  $e$  は原地盤に比べ若干小さいようであるが、顕著な差異は認められない。なお、載荷後圧密によって  $p_c$  は増加し、 $C_c$  および  $e$  が減少するのは当然である。さらに、図は省略するが圧密係数  $c_\alpha$  および体積圧縮係数  $m_v$  も正規圧密領域で見ると、原地盤に比べて顕著な差異は認められなかった。これらのことから、隆起地盤粘性土の圧密特性も原地盤のそれとほぼ同様と考えてよい。

以上の結果は、隆起地盤を活用する場合の設計に関し重要な知見を与えているものと考えられる。

(3) 隆起地盤に打設された砂杭の形状と特性

隆起地盤部分の改良方式として、大口徑のサンドドレーン用砂杭の使用が考えられ、本実験で実施した。その有用性をみるためには、砂杭が連続して所定の形状で造成されているかどうかを調べる必要がある。また、隆起地盤は砂杭打設によって乱され大きく移動するから、

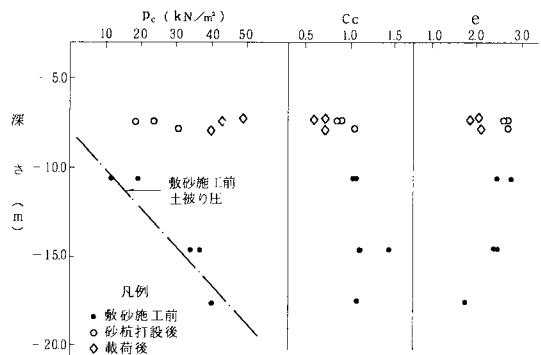


図-15 圧密特性の変化

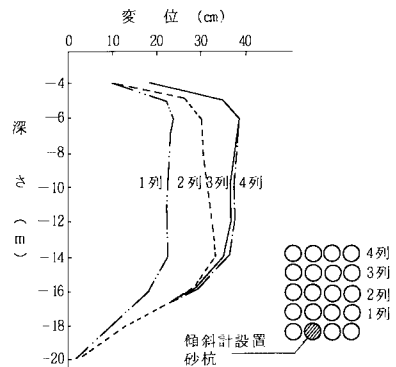
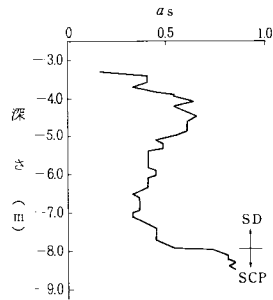


図-16 砂杭打設に伴う既設砂杭の変位



図—17 サンドドレーン用砂杭の断面積

表—3 砂杭中の細粒分含有率

	平均値	標準偏差
使用砂	12.0%	1.9%
大口径サンドドレーン用砂杭	11.0%	3.7%
締固め砂杭	12.2%	2.3%

既打設砂杭への影響も重要である。

砂杭打設中の既打設砂杭の変位を傾斜計で測った結果を図—16に示す。砂杭最下端は砂層によって拘束されているから変位は小さい。これに対し、-5 m から-15 m の間の変位は 36~39 cm に及ぶが、コーン貫入試験によって形状を調べた結果、砂杭の切断は認められなかった。ちなみに、上記変位量は砂杭の直径に比べて 1/4~1/3 の大きさである。図からわかるように、変形の推移をみると隣接する 3 列目までの砂杭打設時に大きく変位するが、それ以降の砂杭打設による影響は小さい。

コーン貫入試験によって隆起地盤部分のサンドドレーン用砂杭の形状を調査し、その断面積を砂置換率  $\alpha_s$  の深度分布として示したのが図—17である。増減はあるが連続してほぼ所定の断面積 ( $\alpha_s=0.4$ ) が確保されていることがわかる。

砂杭中の  $N$  値についてみると<sup>2)</sup>、大口径のサンドドレーン用砂杭は載荷前に  $N=3.6$  であり、全体としてゆるい砂杭が造成されている。載荷後では  $N=3.9$  と大差ない値であった。一方、締固め砂杭については  $N=18$  であり、過去の施工事例からみて標準的な強度といえる。

造成された砂杭からサンプリングして粒度分析を行い、その細粒分を砂杭に使用した砂のそれと比較したのが表—3である。サンドドレーン用砂杭、締固め砂杭ともに、打設前後で細粒分の顕著な差はない。すなわち、砂杭の透水性を低下させるような粘土分の混入はないと結論できる。

以上の諸結果から、要請される所定の砂杭を隆起地盤中に造成することが可能であることが明らかになった。

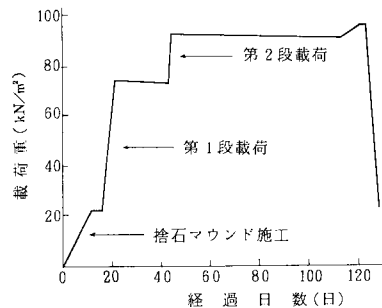
## 5. 砂杭で処理した隆起地盤の載荷時の特性

### (1) 隆起地盤の変形特性

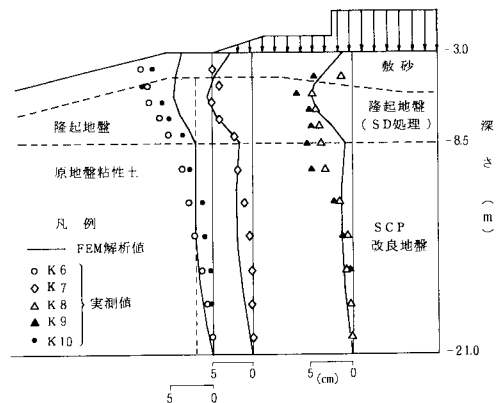
砂杭で処理した隆起地盤が、構造物の基礎地盤の一部として活用できるかどうかを、載荷時の変形、沈下、安定に関する動態観測結果をもとに検討した。

載荷は底版付きコルゲートセルに中詰砂を 2 段に分けて投入する方法によった。中詰砂の単位体積重量  $\gamma_s$  をラジオアイソトープによって計測し、これを用いると、載荷重は捨石マウンド時 22.4 kN/m<sup>2</sup>、第 1 段載荷時 74.3 kN/m<sup>2</sup>、第 2 段載荷時 92.4 kN/m<sup>2</sup> と推定された。図—18 に載荷重の推移を示す。同図で載荷放置期間中に荷重が減少しているのは、地盤の圧密沈下に伴い載荷体の海中水浸部分が増加したことによる。

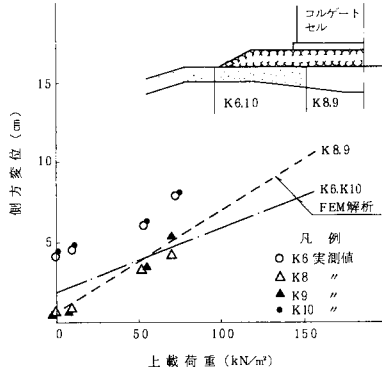
載荷時の隆起地盤の変形を砂杭および杭間粘土中に設置した傾斜計で計測し、その一例を図—19 に示す。深度方向にみると、隆起地盤中のサンドドレーン用砂杭と原地盤中の締固め砂杭はほぼ連続的に変形していることがわかる。載荷体直下および改良域端部における最大側方変位を図—20 に示す。最大変位は載荷重の増加とともにほぼ直線的に増加するが、第 2 段載荷時において 5~8 cm とそれほど大きくない。これは、地盤支持力に対して載荷重にまだ余裕のあったことを示唆している。改良域端部の変位が載荷体直下よりも大きいのは当然であり、改良域端部では捨石マウンド設置時に生じた約 4



図—18 載荷重の推移



図—19 実測水平変位とFEM解析値の比較



図一20 上載荷重と最大側方変位

cmの変位が効いている。

一方、有限要素法による変形解析を行い実測値と比較した。モデルは解析の容易さを考慮して二次元弾性モデルを主として用いた。モデル化にあたり、隆起地盤中のサンドドレーン用砂杭については各砂杭を要素として設定した。また原地盤中の締固め砂杭に関しては、砂置換率が0.7と非常に大きいので、変形係数を砂杭部と粘土部の面積比を用いて重み付き平均し、一様な土性を有する地盤として取り扱った。水平変位の実測値とFEM解析値の対比を図一19に示す。載荷体および捨石マウンド直下の変位に関しては実測値と解析値がよく一致しているが、改良域端部では隆起地盤部分において解析値よりも実測値の方が約3cm大きい。これは、図一20でみたように、捨石マウンド設置時に生じた初期変位の影響であり、その後の変位増分だけをみれば両者はよく一致している。

以上のことから、隆起地盤の変形は、サンドドレーン用砂杭の剛性を考慮した二次元弾性モデルによってよく説明できると考えられる。

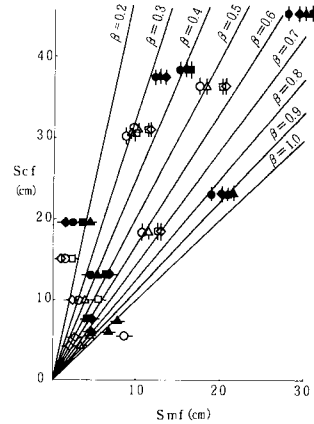
(2) 隆起地盤の圧密沈下特性

隆起地盤の圧密沈下特性を、沈下計および間隙水圧計による動態観測結果に基づき検討した。

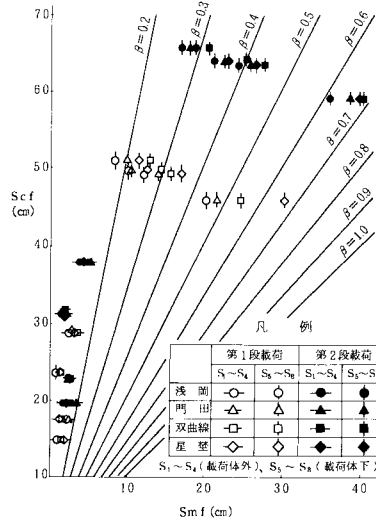
層別沈下計によって計測した杭間粘土および砂杭の沈下量を隆起地盤部と原地盤部に分けてまとめたのが表一4である。まず全沈下量を見ると、載荷体直下では杭間粘土と砂杭で大きな差があるのに対し、改良域端部(載荷体外)では両者にはほとんど差が認められない。

表一4 砂杭および杭間粘性土の沈下量

	改良域端部 (cm)				載荷体直下 (cm)			
	S1 (砂杭)	S2 (砂杭)	S3 (杭間)	S4 (杭間)	S6 (砂杭)	S8 (砂杭)	S5 (杭間)	S7 (杭間)
全沈下量	11.9	10.7	13.4	10.5	35.8	38.2	58.6	61.9
隆起地盤部	8.9	8.6	10.4	4.4	17.2	15.2	31.9	21.5
原地盤部	3.0	3.1	3.0	6.1	18.6	23.0	26.6	40.4



(a) 隆起地盤部



(b) 原地盤部

図一21  $S_{mf}$  と  $S_{cf}$  の相関

実測沈下量に基づく最終予測沈下量  $S_{mf}$  と地盤を無処理と仮定した場合の最終計算沈下量  $S_{cf}$  を、隆起地盤部と原地盤部に分けて図一21に示す<sup>2)</sup>。実測沈下量に基づく沈下推定法は、浅岡法<sup>3)</sup>、門田法<sup>4)</sup>、双曲線法<sup>5)</sup>、星野法<sup>6)</sup>を用いた。図中に沈下低減係数  $\beta(S_{mf}/S_{cf})$  のラインを記入したが、これを見るといずれの測定点も  $\beta$  は1.0より小さく、隆起地盤部、原地盤部とも砂杭による沈下低減効果が認められる。隆起地盤部におけるサンドドレーン用砂杭の沈下低減効果は、当然ながら原地盤部における締固め砂杭のそれに比較して若干小さい。

実測した沈下量および間隙水圧(隆起地盤内)の推移を図一22に示す。沈下量  $S_m$  に関しては、縦軸に  $S_m(t)/S_{mf}$  ( $t$ は経過時間を示す)を取り、4か所の測定値の分布範囲として表示してある。また間隙水圧  $u$  に関しては、各測点ごとに  $\{u_0 - u(t)\}/u_0$  を縦軸に取っ



てプロットした。まず図 (a) の隆起地盤部についてみると、沈下と間隙水圧の消散はほぼ同時進行している。また同図には、圧密理論によって計算した圧密度の推移曲線を圧密係数をパラメーターにして記入してある。これらと沈下量および間隙水圧の実測曲線の対応からおおよその圧密係数を求め、圧密試験により得られた圧密係数と比較したのが表-5である。実測値に関する図-22の縦軸の値が厳密な意味での圧密度にはなっていないので概略の議論ではあるが、大略以下のことがいえる。隆起地盤部、原地盤部とも、第2段载荷時の圧密係数は第1段载荷時よりも小さくなる。隆起地盤部のみみれば、第1段载荷時には圧密試験値を若干上回るが、第2段载荷時には同程度となる。一方、原地盤部では第1段、第2段载荷時とも、圧密試験値の1/3から1/2となっている。締固め砂杭で処理した原地盤部についてはやや圧密の遅れがあるのに対し、サンドドレーン用砂杭で処理し

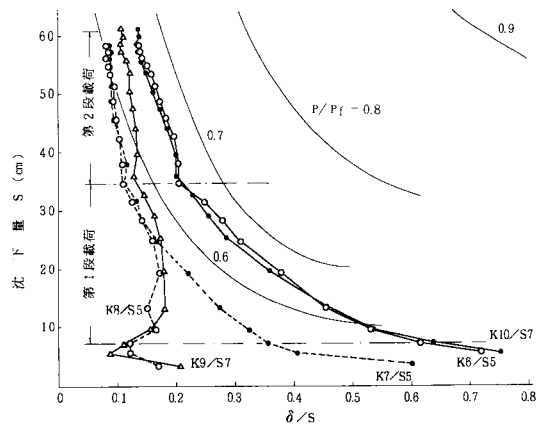


図-23 S~δ/S管理図

た隆起地盤部ではこの傾向は認められなかった。

以上のことから、サンドドレーン用砂杭で処理した隆起地盤部についても、砂杭による沈下低減効果と排水効果が確認できた。

(3) 载荷時の安定管理

隆起地盤の安定性を調べるためには载荷重の最大値を極力大きくすることが望ましいが、前述のように、本実験は岸壁本工事との関連で非破壊実験であるため、载荷重の選択と安定管理には細心の注意が必要であった。

地盤の沈下と側方変位、载荷体の沈下および傾斜等を計測し、これらの計測値に急激な変化がないかどうかを常に確認するとともに、陸上工事において実績のある松尾・川村法<sup>7)</sup>を用いて安定管理を行った。図-23は、傾斜および沈下の実測値を松尾・川村の管理図にプロットした結果である。ここに、Sは沈下量、δは最大側方変位量、またP/P<sub>f</sub>=0.8, 0.9等は松尾・川村により提案されている管理曲線であり、P<sub>f</sub>は破壊時の盛土荷重、Pはそれに至るまでの任意時点の盛土荷重である。

海上工事での上記管理図の適用例が少ないことを考慮して管理目標値を0.8と小さく設定したが、結果的には、図-23にみるように载荷中P/P<sub>f</sub>が0.7以下の範囲で安定的に推移した。また、5か月間の計測から計器の信頼性も確認することができ、载荷安定管理手法の海上工事での適用について成果と自信を得た。ただし、非破壊試験に対する安全側の見地から、設計段階では最も危険な断面を対象にし、かつ砂杭への応力集中も小さいめに設定したので、当初の管理目標を下回る荷重範囲で実験を終わった。やむを得ないことではあったが、より大きな管理目標値に関する実証の面で検討の余地を残した。

6. 結論

図-3を振り返りつつ、4., 5.の検討結果をもとに、

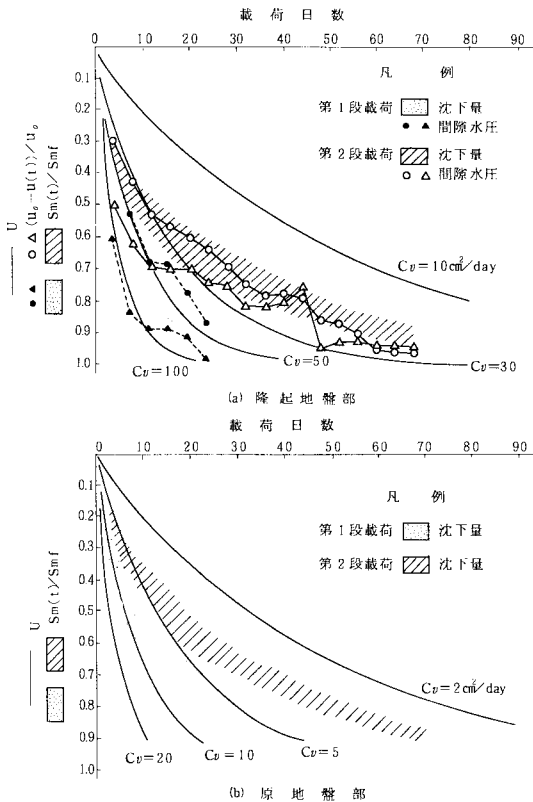


図-22 沈下量および間隙水圧による圧密度の推移

表-5 u~t lineより得られる圧密係数 (cm²/day)

	u~t lineより得られるC <sub>v</sub>		土質試験C <sub>v</sub>
	サンドドレーン部	締固め砂杭部	
第1段载荷時	50~100	5~15	14~35
第2段载荷時	15~30	3~5	

技術的課題に対する考察を中心に本研究で得られた成果を結論的にとりまとめると以下のようである。

第1は、隆起地盤の形状、メカニズム、性質についてである。すなわち、(1)隆起地盤の形状は砂杭打設方向の影響が大きく、未改良域へ粘性土を押しやる形で発達する。このことは地盤の側方流動や強度低下など、周辺地盤の乱れの範囲とも対応している。(2)隆起高さ、隆起率については、砂置換率、砂杭長、一軸圧縮強度をもとに提案されている従来の推定式により一応の予測が可能である。(3)隆起地盤の性質を原地盤と対比してみると、まず単位体積重量、含水比は砂杭打設直後はほとんど変わらず、粘土部への砂の混入もない。強度は砂杭打設直後に低下するが、改良域内では3か月以内にほぼ原地盤強度へ回復する。一方、隆起地盤は隆起後の地表面を基準として正規圧密状態となっており、また、土質試験から得られた圧密諸係数は原地盤と大差ない。以上のことから、隆起地盤の性質は原地盤と同等であると結論できる。

第2は、隆起地盤を処理するために造成された大口径のサンドドレーン用砂杭の形状、機能についてである。すなわち(4)既設砂杭は新設砂杭の打設によって移動するものの、その移動量は小さく、所要の断面積を有していた。このことから、砂杭の機能上支障となる曲がり、切断の可能性は低く、隆起地盤の砂杭による処理はこれを確実に行うことが可能である。(5) 載荷後の実測沈下や変形量、さらにそれらに関する解析結果からみて、砂杭としての効果が認められた。

第3は、載荷時の安定と沈下である。すなわち、(6)実験における載荷重に対する側方変位量は最大約8cm程度であり、砂杭に顕著なくびれ等はなかった。この変位量は砂杭の剛性を考慮した弾性変形解析結果とほぼ一致した。(7)圧密沈下解析により砂杭の沈下低減効果と排水効果が認められた。(8)動態観測に基づく載荷中の安定管理については、海上工事への松尾・川村法の適用を試み、安定管理基準値の一応の目安を得ることができた。

以上のように、隆起地盤の活用に関する技術的課題に

ついてはほぼその全容を把握することができ、締固め砂杭工法の重要課題となっていた隆起地盤は、この部分を砂杭処理することによって構造物の基礎地盤として有効利用できることが実証できた。今後、その利用の具体化を図るため、事例分析を含めた研究を通して設計法を確立していくことが必要と考えている。

**謝 辞：**本研究は、運輸省第三港湾建設局関西国際空港計画室が昭和57年度から58年度にかけて実施した、締固め砂杭工法の現場実験結果を用いてまとめたものである。本研究の成果は、(社)日本埋立浚渫協会に設けられた調査委員会(委員長：村山朔郎京都大学名誉教授、副委員長：中瀬明男東京工業大学教授)における討議に基づく人念な実験、および得られた膨大なデータの解析にご助力下さった方々の努力に負うところが大きい。著者に対して調査成果の利用と本論文の発表を許可下さった運輸省第三港湾建設局ならびに調査委員会の委員各位に対し、深く感謝する次第であります。

#### 参 考 文 献

- 1) 曾我部隆久：サンドコンパクションパイル工法の設計・施工の技術的課題，第36回土木学会年次学術講演会研究討議会資料，pp.39～50，1981。
- 2) 平尾寿雄：締固め砂杭の応力分担比に関する現場載荷実験に基づく考察，複合地盤の強度および変形に関するシンポジウム発表論文集，pp.125～128，1984。
- 3) Asaoka, A. : Observational procedure of settlement prediction, Soils and Foundation, Vol.18, No.4, pp.87～101, 1978.
- 4) Monden, H. : A new time fitting method for the settlement analysis of foundation on soft clays, Memoir of Fac. Eng. Hiroshima Univ., Vol.2, No.1, pp.21, 1963.
- 5) 吉国 洋：土の圧縮と圧密，土質工学ハンドブック，土質工学会，pp.180，1982。
- 6) 星 桢 和：最近における基礎の諸問題，土木学会誌，Vol.47, No.7, pp.63～67，1962。
- 7) 松尾 稔・川村国夫：軟弱地盤上の盛土施工に関する施工管理図，土と基礎，No.245, pp.5～10，1978。

(1985.2.12・受付)